中国生态农业学报 2017 年 3 月 第 25 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2017, 25(3): 328−336

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160833

张凯, 周婕, 赵杰, 裴宽, 王志敏, 胡跃高, 曾昭海. 华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究——以河北省吴桥县为例[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 328−336
Zhang K, Zhou J, Zhao J, Pei K, Wang Z M, Hu Y G, Zeng Z H. Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 328−336

华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究*
——以河北省吴桥县为例

张 凯[1†], 周 婕[1, 2†], 赵 杰[1], 裴 宽[1], 王志敏[1], 胡跃高[1], 曾昭海[1**]

(1. 中国农业大学农学院 北京 100193; 2. 广西壮族自治区柳州市农业局 柳州 545005)

摘 要: 本研究采用地下水足迹分析方法, 以华北平原传统冬小麦-夏玉米两熟区河北省吴桥县为例, 开展冬小麦、夏玉米两熟复种体系农业地下水资源消耗研究, 在此基础上分析了不同作物地下水足迹对地下水资源的影响, 以期为华北平原地下水超采区种植结构调整提供理论依据。研究结果表明, 自 1949 年以来, 吴桥县冬小麦地下水足迹均高于夏玉米, 历年冬小麦和夏玉米的地下水足迹均值分别为 89.02 km^2 和 29.84 km^2。从变化趋势来看, 吴桥县冬小麦和夏玉米的地下水足迹均呈波动上升的趋势。而作物地下水足迹胁迫指数(GF/A_{aq}), 冬小麦基本处于中等程度胁迫(0.1<GF/A_{aq}<1), 夏玉米绝大多数年份处于较轻程度胁迫(0.01<GF/A_{aq}<0.1), 但两种作物胁迫指数近年来不断增加。对该区域其他作物地下水足迹计算结果表明, 夏花生和马铃薯的每平方米地下水足迹较低, 分别为 2.08×10^{-7} km^2 和 1.94×10^{-7} km^2, 且两者的每平方米地下水足迹胁迫指数在被比较作物中同样最低, 分别为 3.57×10^{-10} 和 3.34× 10^{-10}。根据作物比较认为传统冬小麦-夏玉米种植模式可以通过在农作制度调整过程中将花生、马铃薯作为替代作物引入到当地的种植结构中, 可在一定程度上减少对地下水资源的消耗, 从而缓解区域环境中的地下水资源压力。因此, 为改善华北平原农业地下水资源的利用状况, 可以通过调整作物种植结构, 增加低耗水作物与主粮作物复种轮作的面积有效控制地下水资源的开采, 实现农业的可持续发展。

关键词: 冬小麦-夏玉米复种; 地下水足迹; 地下水足迹胁迫指数; 种植结构; 华北平原
中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)03-0328-09

Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province*

ZHANG Kai[1†], ZHOU Jie[1,2†], ZHAO Jie[1], PEI Kuan[1], WANG Zhimin[1], HU Yuegao[1], ZENG Zhaohai[1**]

(1. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Liuzhou Agricultural Bureau of Guangxizhuang Autonomous Region, Liuzhou 545005, China)

Abstract: As a newly developed concept and research method for water footprint studies in recent years, groundwater footprint (GF) could be used to evaluate potential use of renewable groundwater to increase agricultural production or in combination

* 公益性行业(农业)科研专项(201503121-11)、国家重点研发计划项目(2016YFD0300205-01)和河北省科技攻关项目(14227008D)资助
** 通讯作者: 曾昭海, 研究方向为现代农作制研究。E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn
† 同等贡献者: 张凯, 研究方向为农田耕作与生态研究, E-mail: zhangkai4221@foxmail.com; 周婕, 研究方向为农田耕作与生态研究, E-mail: zhjie1120@163.com
收稿日期: 2016-09-18 接受日期: 2016-12-07
* Supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503121-11), the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300205-01) and the Key Technologies R&D Program of Hebei Province of China (14227008D)
** Corresponding author, E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn
Received Sep. 18, 2016; accepted Dec. 7, 2016

with water footprint and virtual water calculations. The GF method was used to analyze the groundwater resources utilization in agriculture and to assess the environmental impacts in wheat-maize crop rotation system at Wuqiao Experiment Station — a traditional region where wheat-maize crop rotation is practiced in the North China Plain. This study was based on the latest developments in theories and methods of GF in combination with agricultural practices. In addition, GFs of crops were calculated at county scale, and the impact of the different crops on GF analyzed for Wuqiao County in Hebei Province. The results showed that since 1949, GF of winter wheat was higher than that of summer maize, with respective mean values of 89.02 km^2 and 29.84 km^2 for Wuqiao County. Also based on the trend of change, GF of winter wheat and summer maize had an increasing trend of fluctuation. In terms of GF stress index (GF per unit area, GF/A_{aq}) for the crops, winter wheat basically had a moderate stress ($0.1 < GF/A_{aq} < 1$) and the stress index for summer maize was less ($0.01 < GF/A_{aq} < 0.1$) for most the years, which increased for recent years. Thus if reasonable measures were not taken to control cultivation, GF would increase and have a significant impact on the balance of water circulation in regional environmental system in the coming years. This would put considerable pressure on groundwater resources to meet water needs of crops in Wuqiao County. The research suggested that to reduce groundwater pressure and ensure effective restoration of groundwater resources, the traditional wheat-maize cropping system could be adjusted through the cultivation of peanut and potato, whose GFs were 2.08×10^{-7} $km^2\cdot m^{-2}$ and 1.94×10^{-7} $km^2\cdot m^{-2}$, around 40% and 58% less than that of winter wheat. Thus through the exploration of GF, cropping structure in Wuqiao County could be adjusted or the area of crop rotation between low water-consumption crops and staple grain crops could be increased to enhance the use of water-saving technologies and improvement of water-saving measures. The study showed that GF analysis had the potential for application in agricultural research. It was concluded that in future, basic GF research should be enhanced and GF parameter database construction at various scales and for various crops were required to provide a solid basis for research on sustainable use of groundwater resources and the development of sound government policies.

Keywords: Winter wheat and summer maize rotation; Groundwater footprint; Groundwater footprint stress index; Plantation structure; North China Plain

随着中国社会经济的发展和人口的增加，水资源短缺已成为影响我国可持续发展的重要瓶颈[1]。我国农业用水量占全国用水量的一半以上，其中灌溉用水占比例较高[2]。华北平原地表水资源严重缺乏，地下水被广泛用于农业灌溉和饮用水源，农业开采地下水量占总地下水开采量的 70%以上[3]，该区域部分地区暴露出了严重的地下水超采问题，且造成了严重的生态环境破坏，过度抽取地下水进行灌溉限制了华北平原地区的农业可持续发展[4]。

近年来关于华北平原水资源的报道较多，其中水足迹的研究一直是国内外水资源研究领域的热点与前沿[5-6]。水足迹的概念自 2002 年提出后[7]，对传统水资源的评价方式做出了改变，也引发人们对水资源管理的另一种角度思考。在此背景下，Gleeson 等[8-10]2012 年提出了地下水足迹的概念，它是对地下水资源量进行评价的指标，也是对已建立的水足迹方法的补充，通过利用地下水足迹的方法可以将特定的作物与当地的地下水资源利用情况联系起来，更好地评价区域的地下水资源安全状况。韩玉等[11]通过水足迹的方法对河北省水资源安全进行了评价，认为大部分农业区的灌溉用水约 80%取自地下水，人均水资源量和单位面积水资源量仅是全国平均水平的 14%和 13%，农业活动对地下水的影响强烈，是地下水超采的主导因素。陈素英等[12]对华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用进行分析后认为，在保证区域粮食安全的条件下，通过调整农业种植结构可以控制水资源的过度开采。也有学者通过研究河北低平原区不同种植模式对区域地下水平衡及水分经济利用效率的影响，从区域农业水资源可持续发展的角度，认为该区适合发展棉花(*Gossypium hirsutum*)-冬小麦(*Triticum aestivum*)-夏玉米(*Zea mays*)两年 3 作种植模式[13]。但上述学者多是通过试验和统计数据以及水足迹的方法进行分析研究，鲜见通过地下水足迹这种新型评价手段开展的研究。因此，利用地下水足迹方法研究我国主要地下水消耗地区作物的种植结构对环境中地下水资源利用的影响，有利于指导区域地下水资源的可持续利用。本研究从河北省吴桥县的作物种植情况入手，采用地下水足迹的方法对该地区习惯种植作物冬小麦和夏玉米进行作物地下水足迹核算，通过估算作物地下水足迹胁迫指数对农业地下水资源利用问题进行评价，以期对我国华北平原地下水超采区环境中地下水资源的可持续利用和种植模式调整提供理论依据。

1 材料与方法

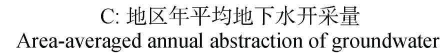
1.1 地下水足迹的概念

地下水资源是指在一定期限内，能提供给人类

使用的，且能逐年得到恢复的地下淡水量[14]。而地下水足迹则是指为维持某一地区地下水使用以及依赖地下水的生态系统的正常运作，所需蓄水层区域的面积。地下水足迹可以用于评价自然储存和流动的地下水消耗量的变化，同时也是对已建立水足迹方法的补充。地下水足迹的概念可用以下定义式表示[8]:

$$GF=(A\times C)/(R-E) \quad (1)$$

式中: GF 为地下水足迹(km^2), C 为地区年平均地下水开采量, R 为补给率, E 为地下水对环境流的贡献量($m^3\cdot a^{-1}$), A 为 C、R、E 所研究区域蓄水层面积(km^2)。地下水足迹本质上是蓄水层入流量(R)和出流量(C, E)之间的水量平衡，见图1，其数据来自实际观察以及模型输出。尽管实际地下水开采量较难获得，但 C 值可直接利用研究区域的地下水使用量来代替，R 代表研究区长期自然补给与灌溉补给流入量的总和，E 指地下水分配给地表径流以支撑生态系统服务的部分水量，它在枯水径流期尤为重要。地下水补给率 R 是地下水足迹计算中不确定性的主要来源[9-10]，R 的估算可由模型输出、化学示踪、实测调查等获得[15-16]。



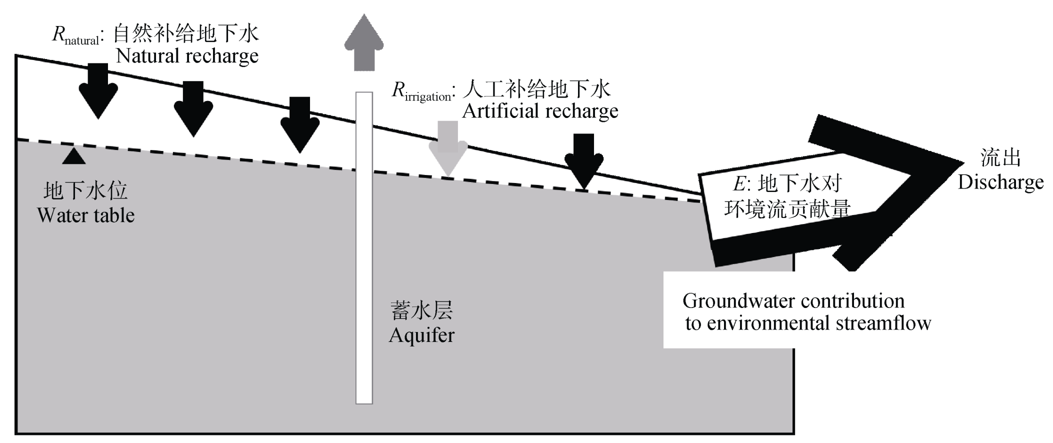


图 1 蓄水层地下水足迹的入流与出流示意图

Fig. 1 Sketch map of an aquifer with inputs and outputs of groundwater footprint

资料修改自 Gleeson 等[8]。Quoted from Gleeson et al[8].

1.2 地下水足迹核算方法及评价

1.2.1 作物地下水足迹核算方法

本研究根据 Esnault 等[9]于 2014 年提出的针对特定作物耗水量的计算公式，以河北省吴桥县为例进行作物地下水足迹的估算，作物地下水足迹的核算公式为:

$$GF_{i,aq}=(B_{i,co}/e_{i,co}\times A_{i,co}\times p_i)/(R_{aq}-E_{aq}) \quad (2)$$

式中: i 为给定作物类型(在本研究中，我们以吴桥县为例，吴桥当地的传统种植模式为冬小麦-夏玉米模式，故本文中核算作物类型为冬小麦和夏玉米); co 为县域尺度数据; aq 为蓄水层尺度数据。$GF_{i,aq}$ 为特定作物、特定蓄水层区域的地下水足迹; $B_{i,co}$ 为作物的净蓝水需求量，即净灌溉需求量; $e_{i,co}$ 为总灌溉效率($e_{i,co}=e_{c,co}\times e_{ai}\times e_m$。$e_{c,co}$ 为水传输系统效率; e_{ai} 为灌溉用水效率; e_m 为管理因素); $A_{i,co}$ 为灌溉作物面积; p_i 为使用地下水灌溉的作物面积的比例; R_{aq} 为特定区域蓄水层下的地下水补给率; E_{aq} 为环境流量。

1.2.2 作物地下水足迹评价

在对作物地下水足迹进行核算后，将得到的作物地下水足迹 $GF_{i,aq}$ 与区域面积 A_{aq} 相比所得比值为作物地下水足迹胁迫指数，该指数越大，表明该种作物所占当地地下水足迹越多，对地下水资源的消耗程度越大。为了更方便地评价吴桥县冬小麦、夏玉米的作物地下水足迹胁迫程度，参考 Esnault 等[9]的研究方法我们将 GF/A_{aq} 的计算结果分为 5 个等级: $GF/A_{aq}<0.01$ 为轻微程度胁迫; $0.01<GF/A_{aq}<0.1$ 为较轻程度胁迫; $0.1<GF/A_{aq}<1$ 为中等程度胁迫; $1<GF/A_{aq}<10$ 为较重程度胁迫; $GF/A_{aq}>10$ 为严重程度胁迫。

1.3 研究区概况及数据来源

华北平原位于112°30′E~119°30′E, 34°46′N~40°25′N, 北起燕山，南至黄河，东临渤海，西以太行山为界(图 2)。在行政区划上，包括北京、天津、河北省(市)所辖管的全部平原，以及黄河以北的豫北和鲁北平原，面积 13.92 万 km^2，总人口 1.33 亿人[3,17-18]。河北省吴桥县位于华北平原的中心，该地点年均降雨量 562 mm，主要分布在 6—8 月份。年平均气温 12.9 ℃，全年积温(≥0 ℃)为 4 826 ℃，无霜期 201 d，年日照时间数为 2 724 h。近 10 年的年均降雨量和年均气温分别为 544 mm 和 13.1 ℃。

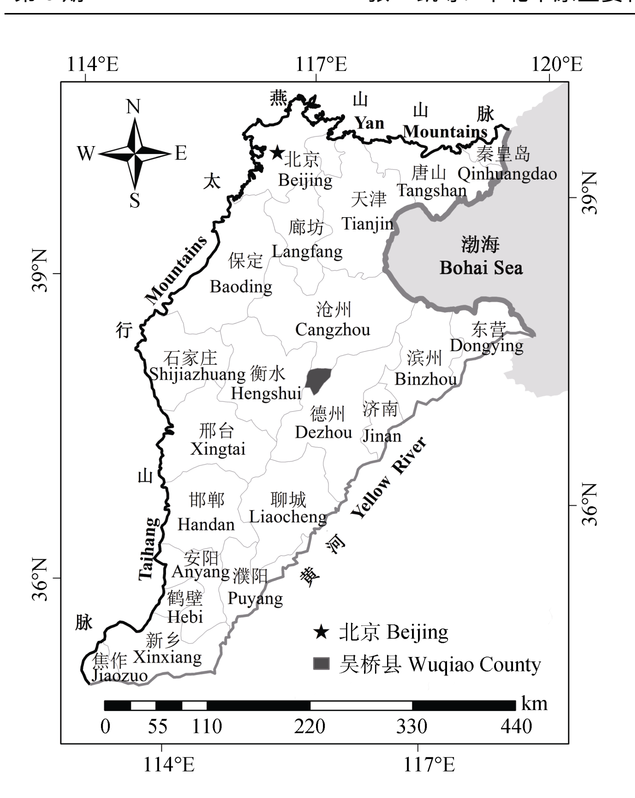


图 2　研究区吴桥县在华北平原的地理位置图

Fig. 2　Location of the study area of Wuqiao County in the North China Plain

数据来源于国家地理测绘信息局(http://www.sbsm.gov.cn/article/zxbs/dtfw/)。The map was obtained from a public and open website affiliated with the State Bureau of Surveying and Mapping (http://www.sbsm.gov.cn/article/zxbs/dtfw/).

本文涉及地下水足迹核算的作物除上文提到的冬小麦和夏玉米外，还包含花生(*Arachis hypogaea*)、棉花、马铃薯(*Solanum tuberosum*)等，其中冬小麦、夏玉米、棉花和花生是吴桥县当地的常年习惯种植作物。刘钰等[19-23]研究了我国主要作物的灌溉需水量，从中整理出以上部分作物的灌溉需水量，用于作物地下水足迹的计算；马铃薯的灌溉量及相关参数引用王丽霞等[24-30]的研究结果；花生的灌溉量及相关参数引用万书波等[21,31-32]的研究结果。国内对作物灌溉用水效率的研究很多，但缺乏针对区域作物种类灌溉用水效率(e_{ai})的研究，故在本文中参照Esnault 等[9]的研究值进行估算；对于管理因素(e_m)，在本研究中参考 Rohwer 等[33]的研究结果，取 0.95 进行计算；在吴桥县实际生产中，农民灌溉大多采用"小白龙"软管灌溉方法抽取地下水对农田进行大水漫灌，富作礼等[34-36]的研究表明，"小白龙"软管灌溉的方法会造成 2%~3%的灌溉水损失，本文以最少损失计，故取传输系统效率参数($e_{c,co}$)的值为 0.98；灌溉作物面积($A_{i,co}$)数据从吴桥县年鉴中获得，包括 1949 年以来的冬小麦和夏玉米播种面积；地下水灌溉作物的面积比例(p_i)代表研究区域利用地下水灌溉的作物面积的比例，吴桥县属于沧州地区，地表水水源匮乏，农业灌溉只能依靠地下水，故吴桥县利用地下水灌溉的作物面积比例为 100%，在计算中取 p_i 的值为 1；吴桥县地下水补给量(R)值为 0.839×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$[37]；本研究采取将 E=0 的方法对当地作物的地下水足迹进行估算[8]。具体相关参数见表 1。

表 1　吴桥县计算作物地下水足迹所需相关参数

Table 1　Parameters for calculating crop groundwater footprint in Wuqiao County

作物 Crop	$B_{i,co}$ ($mm\cdot a^{-1}$)	$e_{c,co}$	e_{ai}	e_m	p_i	R (10^8 $m^3\cdot a^{-1}$)	E
冬小麦 Winter wheat	350	0.98	0.82	0.95	1	0.839	0
夏玉米 Summer maize	150	0.98	0.81	0.95	1	0.839	0
春玉米 Spring maize	300	0.98	0.81	0.95	1	0.839	0
春花生 Spring peanut	220	0.98	0.80	0.95	1	0.839	0
夏花生 Summer peanut	130	0.98	0.80	0.95	1	0.839	0
棉花 Cotton	300	0.98	0.82	0.95	1	0.839	0
马铃薯 Potato	120	0.98	0.79	0.95	1	0.839	0
油料 Oil crops	200	0.98	0.81	0.95	1	0.839	0

$B_{i,co}$: 净灌溉需求量; $e_{c,co}$: 传输系统效率; e_{ai}: 灌溉用水效率; e_m: 管理因素; p_i: 地下水灌溉作物面积所占比例; R: 地下水补给量; E: 环境流量。$B_{i,co}$: net blue water requirement; $e_{c,co}$: conveyance system efficiency; e_{ai}: irrigation water use efficiency; e_m: management factor; p_i: area proportion of crop irrigated by groundwater; R: recharge; E: environmental flow requirements.

2　结果与分析

2.1　吴桥县历年小麦、玉米作物地下水足迹核算

利用作物地下水足迹的核算方法，结合所获得的吴桥地区作物的相关参数，计算得到吴桥县冬小麦、夏玉米 1949—2015 年的作物地下水足迹，结果如图 3 所示。

自 1949 年以来，吴桥县冬小麦地下水足迹均高于夏玉米地下水足迹，约为夏玉米地下水足迹的两倍。历年吴桥县冬小麦的地下水足迹平均值为 89.02 km^2，而夏玉米为 29.84 km^2。从变化趋势来看，吴桥县冬小麦和夏玉米的地下水足迹均呈波动上升

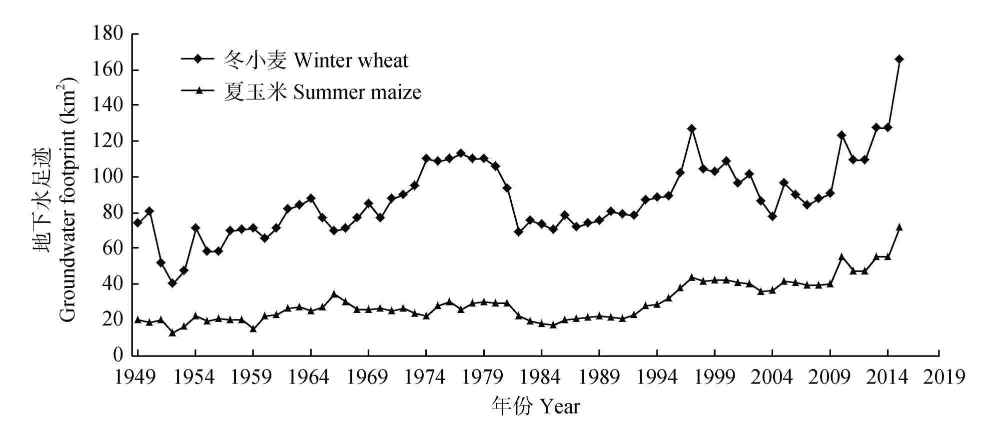


图 3 吴桥县冬小麦、夏玉米 **1949—2015** 年作物地下水足迹核算

Fig. 3 Crop groundwater footprints of winter wheat and summer maize from 1949 to 2015 in Wuqiao County

趋势。冬小麦的地下水足迹最高值出现在 2015 年，为 165.74 km^2，相较 2014 年，增加约 30%，近几年呈上升趋势，且总体地下水足迹变化的波动性较大。而吴桥县当地夏玉米种植在每年的 6 月中上旬，其生长期内降雨相对充足，年际间存在差异，但所需的灌溉地下水较少，故其产生的作物地下水足迹也较少。从图中可以看出，吴桥县历年夏玉米地下水足迹也在逐年稳定上升。可以预见，为满足作物的水分需求，吴桥县的地下水资源将承受压力，若不采取合理的耕作措施加以控制，未来几年冬小麦、夏玉米的地下水足迹仍会增长，将会对地下水循环系统的平衡造成一定影响，进而加重区域性的生态环境问题。

2.2 吴桥县历年冬小麦、夏玉米作物地下水胁迫指数

结合吴桥县蓄水层面积，本研究计算了吴桥县冬小麦、夏玉米 1949—2015 年作物地下水胁迫指数，结果如表 2 所示。由于吴桥县蓄水层面积在本研究中取定值，故冬小麦、夏玉米的作物地下水胁迫指数变化趋势与其地下水足迹的变化趋势相同。根据作物地下水足评价划分的 5 个等级，冬小麦和夏玉米地下水胁迫指数在轻微程度胁迫、较重程度胁迫和严重程度胁迫 3 个等级中均未出现。冬小麦有 4 个年份(1951—1953 年和 1955 年)的作物地下水处于较轻程度胁迫，其余 63 个年份的作物地下水均处于中等程度胁迫。夏玉米除 2015 年为中等程度胁迫外，其他年份的作物地下水均处于较轻程度胁迫。

表 2 吴桥县冬小麦、夏玉米 **1949—2015** 年作物地下水胁迫指数

Table 2 Groundwater footprint stress indexes of winter wheat and summer maize from 1949 to 2015 in Wuqiao County

年份 Year	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	年份 Year	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	年份 Year	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	年份 Year	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize
1949	0.127	0.034	1966	0.119	0.059	1983	0.129	0.033	2000	0.186	0.072
1950	0.138	0.032	1967	0.121	0.052	1984	0.125	0.030	2001	0.165	0.070
1951	0.088	0.034	1968	0.132	0.043	1985	0.121	0.029	2002	0.174	0.068
1952	0.069	0.022	1969	0.145	0.044	1986	0.134	0.034	2003	0.148	0.061
1953	0.081	0.027	1970	0.131	0.045	1987	0.124	0.035	2004	0.133	0.063
1954	0.122	0.038	1971	0.150	0.043	1988	0.126	0.036	2005	0.165	0.071
1955	0.099	0.033	1972	0.154	0.045	1989	0.129	0.038	2006	0.153	0.070
1956	0.100	0.035	1973	0.163	0.040	1990	0.138	0.037	2007	0.144	0.067
1957	0.119	0.034	1974	0.188	0.038	1991	0.136	0.036	2008	0.150	0.068
1958	0.281	0.034	1975	0.186	0.048	1992	0.135	0.039	2009	0.155	0.069
1959	0.121	0.025	1976	0.188	0.051	1993	0.149	0.047	2010	0.211	0.095
1960	0.112	0.038	1977	0.193	0.044	1994	0.152	0.049	2011	0.187	0.081
1961	0.122	0.039	1978	0.188	0.050	1995	0.153	0.055	2012	0.187	0.081
1962	0.140	0.045	1979	0.189	0.051	1996	0.174	0.064	2013	0.219	0.095
1963	0.144	0.046	1980	0.182	0.050	1997	0.217	0.075	2014	0.219	0.095
1964	0.150	0.043	1981	0.160	0.050	1998	0.178	0.071	2015	0.284	0.123
1965	0.131	0.046	1982	0.118	0.037	1999	0.177	0.072			

整理各年份数据可以看出吴桥县冬小麦的地下水足迹胁迫指数基本处于中等程度，且近年来在不断上升；夏玉米的地下水足迹胁迫指数绝大多数年份均处于较轻程度胁迫，变化趋势表现为平稳中缓慢上升，而在 2015 年，地下水足迹胁迫指数从 2014 年的 0.095 上升至 0.123，达中等程度胁迫，将会对地下水循环造成一定的影响。

2.3　吴桥县主要种植作物地下水足迹构成

根据 2013 年吴桥县志中所提及的主要种植作物，计算了主要作物地下水足迹、作物地下水足迹胁迫指数及其所占比例，可以看出该区域主要种植作物地下水足迹的情况(表 3)。油料作物花生的地下水足迹值最小，仅为 1.05 km^2，相对应的作物地下水足迹胁迫指数为 0.002，不到 0.01，属于轻微程度胁迫，在 4 种作物的地下水足迹中所占比例最小，仅占不到 1%。夏玉米的地下水足迹比油料作物高，但比棉花地下水足迹小，其值为 55.31 km^2，夏玉米地下水胁迫指数为 0.095，属于较轻程度胁迫，在 4 种作物的地下水足迹中占比 23%。棉花的地下水足迹比夏玉米稍高，为 61.66 km^2，其地下水足迹胁迫指数为 0.106，属于中等程度胁迫，所占作物地下水足迹比例为 25%，与玉米基本相当。而在 4 种作物中，冬小麦的地下水足迹值最高，为 127.49 km^2，约是棉花地下水足迹的两倍，其冬小麦地下水足迹胁迫指数值为 0.219，在 4 种作物地下水足迹比例中占比最高，达 52%。由上可知，2013 年吴桥县主要农作物地下水足迹约 52%是由冬小麦种植产生，约 25%由棉花种植产生，剩下约 23%由夏玉米种植产生。

表 3　2013 年吴桥县主要作物地下水足迹、胁迫指数及所占比例

Table 3　Groundwater footprints and proportions, and groundwater footprint stress indexes of main crops planted in Wuqiao County in 2013

作物 Crop	地下水足迹 Groundwater footprint (km^2)	地下水足迹胁迫指数 Groundwater footprint stress index	地下水足迹所占比例 Proportion of groundwater footprint (%)
花生 Peanut	1.05	0.002	<1
棉花 Cotton	61.66	0.106	25
冬小麦 Winter wheat	127.49	0.219	52
夏玉米 Summer maize	55.31	0.095	23

2.4　不同作物地下水足迹影响的估算

计算吴桥县每平方米种植不同作物所产生的地下水足迹及胁迫指数见表 4。结果表明：种植冬小麦所产生的地下水足迹最高，为 5.46×10^{-7} km^2·m^{-2}，而每平方米产生地下水足迹最低的是马铃薯，仅为 1.94×10^{-7} km^2，相比冬小麦，能减少约 65%的地下水足迹。棉花种植产生的地下水足迹与冬小麦相近，为 5.15×10^{-7} km^2·m^{-2}，且近年来，吴桥县的棉花种植已逐步减少。与当地常规夏玉米种植相比，种植春玉米所需的灌溉量更大，所产生的地下水足迹约是种植夏玉米的两倍。而地下水足迹胁迫指数中较低的作物为夏花生和马铃薯，假设吴桥县种植花生，每平方米所产生的地下水足迹在 2.08×10^{-7}~3.52×10^{-7} km^2，比冬小麦种植所产生的地下水足迹低约 36%~62%。由此，仅从节省地下水的角度，在该地区农作制度调整过程中将花生、马铃薯作为替代作物引入到当地的种植结构中，将能够在一定程度上减少作物的地下水足迹，同时可以起到缓解当地的地下水压力，促使环境中的地下水资源得到有效恢复。

表 4　吴桥县不同作物每平方米地下水足迹和地下水足迹胁迫指数

Table 4　Groundwater footprints and groundwater footprint stress indexes per unit area of different crops in Wuqiao County

作物 Crop	地下水足迹 Groundwater footprint per unit area (10^{-7} km^2·m^{-2})	地下水足迹胁迫指数 Groundwater footprint stress index (10^{-10})
冬小麦 Winter wheat	5.46	9.37
夏玉米 Summer maize	2.37	4.07
春玉米 Spring maize	4.74	8.13
春花生 Spring peanut	3.52	6.04
夏花生 Summer peanut	2.08	3.57
棉花 Cotton	5.15	8.84
马铃薯 Potato	1.94	3.34

3　讨论与结论

用水足迹进行水资源安全评价时，多是运用了产品虚拟水的研究方法，基于产品从生产、运输、进出口等消费过程来计算相关的虚拟水消费和水足迹[11,38]。对于某一特定作物在特定区域的生产过程中消耗实际地下水的量，由于缺少相应的核算方法及数据资料，多进行估算。本研究通过估算河北省吴桥县不同作物的地下水足迹量，从节省地下水资源的角度，提出了适合该区域的农作制度，与前人在该区域通过试验和统计数据等研究所提出的棉花-冬小麦-夏玉米等种植模式相比，是在种植结构调整内容上的完善和补充[12-13]。然而，本研究主要依据的是 Gleeson 等[8]运用的地下水足迹方法，其对世界范围内几大蓄水层地下水资源的核算评价中，所需数据精确度较低，但 Esnault 等[9]改进了地下水足

迹的核算公式，并结合区域水文数据、作物数据、种植管理数据等，可以将作物生长期利用的地下水资源量通过地下水足迹的表现型式核算出来，使采用地下水足迹方法的研究针对性更强。同时作物地下水足迹将作物在某一区域的种植面积、耗水情况等因素也纳入考虑，在计算出作物地下水足迹数值后，与研究区域的地下水蓄水层面积求比值，得到作物地下水胁迫指数，对区域农作制度的地下水资源利用进行直观评价。该核算方法可以为调整研究区域的种植模式提供理论依据和参照指标，这也是地下水足迹核算方法的应用前景之一。

多年来，专家学者们针对如何缓解华北平原地下水水位下降展开了大量研究，并取得一定效果，如节水灌溉措施、农艺节水措施、种植模式转变等[39-43]。尽管当前华北平原地下水资源的开采形势已经非常严峻，但为了保证农业稳产、人民生活稳定，仍不得不消耗一定的地下水储量，尤其是深层地下水，各地政府也出台了一系列综合治理办法，通过对农业地下水超采区进行压采、加大农业节水技术的利用或调整农业种植结构等方式，缓解华北平原的地下水资源利用问题[12,44-45]。然而王海宁等[46]的研究表明，种植结构发生变化会引起较大的灌水定额变化，而作物种类及枯水期的降水量状况也是影响地下水开采量的主要因素。因此，基于本研究地下水足迹结果的考虑，华北平原地下水资源问题可以通过调整作物种植结构种类实现缓解，根据吴桥县现有的冬小麦-夏玉米种植模式计算，在 1 个种植周期内，每平方米大约产生地下水足迹 7.83×10^{-7} km^2，其胁迫指数相对较高。从节约地下水资源的角度进行分析，本研究引入作物地下水足迹较低的夏花生及马铃薯，通过对假设模式的作物地下水足迹估算，认为该区域可以考虑推荐以下作物种植模式:

1)马铃薯-夏玉米模式：3 月上旬播种马铃薯，6 月中旬收获，随后播种夏玉米。该模式每平方米所产生的地下水足迹为 4.31×10^{-7} km^2，比现有的冬小麦-夏玉米模式每平方米所产生的地下水足迹减少 45%左右。以 2015 年吴桥县冬小麦-夏玉米种植面积 3.03×10^4 km^2 计算，若全部替代为马铃薯-夏玉米模式则每年可减少地下水足迹 106.66 km^2；若 1/2 种植面积替代为马铃薯-夏玉米模式则每年可减少地下水足迹 53.33 km^2。

2)冬小麦-夏花生模式：将传统播种夏玉米的时期改换播种夏花生。该模式每平方米所产生的地下水足迹为 7.54×10^{-7} km^2，比现有的冬小麦-夏玉米模式每平方米所产生的地下水足迹减少 4%左右。以 2015 年吴桥县冬小麦-夏玉米种植面积 3.03×10^4 km^2 计算，若全部替代为冬小麦-夏花生模式则每年可减少地下水足迹 8.79 km^2；若 1/2 种植面积替代为冬小麦-夏花生模式则每年可减少地下水足迹 4.39 km^2。从估算结果可以看出此模式在节省地下水资源方面节水效果较传统模式不明显。

通过以上内容的研究，本文在利用地下水足迹方法对作物地下水足迹进行估算时还存在一些不足。在对地下水足迹估算时只考虑了地下水量的变化，如地下水开采、地下水灌溉等过程中地下水的损耗、利用、回补，并未考虑地下水质的因素。地下水质也会对地下水在农业、工业生活生产上的应用造成影响。另一方面，由于国内并未大范围对地下水足迹方法进行研究和应用，相关可查的数据量较小，本研究以县域范围为基本单元，计算过程中有部分数据、参数来源于文献的二次提取，存在一定的偏差。因此，接下来关于此方法的研究与应用，要进一步挖掘更为精确的区域水文数据、地质数据、农业数据，还要积极扩展研究思路，在方法上进行创新和完善，使地下水足迹在评价水资源安全状况时更有针对性和科学性。

参考文献 References

[1] 严云, 曾宪竞, 王雁萍, 等. 华北平原(曲周)盐碱地区地下水资源现状研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S1): 188–192
Yan Y, Zeng X J, Wang Y P, et al. Groundwater resources of salt lick and alkaline soil in Quzhou County of North China Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(S1): 188–192

[2] 刘涛. 我国农业用水效率的时空差异[J]. 节水灌溉, 2016(3): 75–79
Liu T. Temporal and spatial differences of the agricultural water use efficiency in China: A comparison of major agricultural provinces[J]. Water Saving Irrigation, 2016(3): 75–79

[3] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1–10
Zhang G H, Fei Y H, Liu C H, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 1–10

[4] Qiu G Y, Wang L M, He X H, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(11): 1848–1859

[5] 周玲玲, 王琳, 王晋. 水足迹理论研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 106–111

Zhou L L, Wang L, Wang J. Review on study of water footprint theory[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5): 106–111

[6] Lu Y, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: A case study in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 116: 71–79

[7] 胡克斯特拉, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2012
Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. Liu J G, Zeng Z, Zhao Q B, et al, trans. Beijing: Science Press, 2012

[8] Gleeson T, Wada Y, Bierkens M F P, et al. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint[J]. Nature, 2012, 488(7410): 197–200

[9] Esnault L, Gleeson T, Wada Y, et al. Linking groundwater use and stress to specific crops using the groundwater footprint in the Central Valley and High Plains aquifer systems, U.S.[J]. Water Resources Research, 2014, 50(6): 4953–4973

[10] Gleeson T, Wada Y. Assessing regional groundwater stress for nations using multiple data sources with the groundwater footprint[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(4): 044010

[11] 韩玉, 杨晓琳, 陈源泉, 等. 基于水足迹的河北省水资源安全评价[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 1031–1038
Han Y, Yang X L, Chen Y Q, et al. Assessment of water resources in Hebei Province based on water footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(8): 1031–1038

[12] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 535–543
Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, et al. A comparative study of yield, cost-benefit and water use efficiency between monoculture of spring maize and double crops of wheat-maize under rain-fed condition in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 535–543

[13] 孙宏勇, 刘小京, 邵立威, 等. 不同种植模式对河北低平原区域地下水平衡和水分经济利用效率等的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(32): 214–220
Sun H Y, Liu X J, Shao L W, et al. Effects of different cropping pattern on ground water and economic water use efficiency in the Hebei low plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(32): 214–220

[14] 段永侯, 肖国强. 河北平原地下水资源与可持续利用[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(1): 2–8
Duan Y H, Xiao G Q. Sustainable utilization of groundwater resources in Hebie Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(1): 2–8

[15] Döll P, Fiedler K. Global-scale modeling of groundwater recharge[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2008, 12(3): 863–885

[16] McMahon P B, Plummer L N, Böhlke J K, et al. A comparison of recharge rates in aquifers of the United States based on groundwater-age data[J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(4): 779–800

[17] Pei H W, Scanlon B R, Shen Y J, et al. Impacts of varying agricultural intensification on crop yield and groundwater resources: Comparison of the North China Plain and US High Plains[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(4): 044013

[18] 吴喜芳, 沈彦俊, 张丛, 等. 基于植被遥感信息的作物蒸散量估算模型——以华北平原冬小麦为例[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 920–927
Wu X F, Shen Y J, Zhang C, et al. Modeling crop evapotranspiration using remotely sensed vegetation data: A case study of winter wheat in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 920–927

[19] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6–12
Liu Y, Wang L, Ni G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6–12

[20] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995
Chen Y M, Guo G S, Wang G X, et al. Main Crop Water Requirement and Irrigation of China[M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1995

[21] 李新红. 全国农业灌溉需水量及区域特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2005
Li X H. Agricultural irrigation water requirement and its regional characteristic in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005

[22] 马林, 杨艳敏, 杨永辉, 等. 华北平原灌溉需水量时空分布及驱动因素[J]. 遥感学报, 2011, 15(2): 324–339
Ma L, Yang Y M, Yang Y H, et al. The distribution and driving factors of irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2): 324–339

[23] 袁再健, 谢栌乐, 张秉文, 等. 河北平原农田净灌溉耗水研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4): 780–784
Yuan Z J, Xie L Y, Zhang B W, et al. Agricultural irrigation water net consumption in the Hebei Plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(4): 780–784

[24] 王丽霞, 陈源泉, 李超, 等. 不同滴灌制度对棉花/马铃薯模式中马铃薯产量和 WUE 的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(10): 1864–1870
Wang L X, Chen Y Q, Li C, et al. Effects of different drip irrigation systems on yield and water use efficiency of potato in intercropping system of cotton and potato[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(10): 1864–1870

[25] 武朝宝, 任罡, 李金玉. 马铃薯需水量与灌溉制度试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 93–95
Wu C B, Ren G, Li J Y. Experimental study on water requirements and irrigation schedule of potato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(3): 93–95

[26] 王凤新, 康跃虎, 刘士平. 滴灌条件下马铃薯耗水规律及需水量的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 9–15

Wang F X, Kang Y H, Liu S P. Patterns of water consumption and requirements of potato under dropping irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 9–15
[27] 田英，黄志刚，于秀芹．马铃薯需水规律试验研究[J]．现代农业科技, 2011(8): 91–92
Tian Y, Huang Z G, Yu X Q. Study on the water requirement test for potato[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011(8): 91–92
[28] 李霄峰，鲁喜荣，田宏先．不同灌溉量对马铃薯产量及品质的影响[J]．内蒙古农业科技, 2011(6): 30
Li X F, Lu X R, Tian H X. Effect of different irrigation amount on potato yield and quality[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2011(6): 30
[29] 韩文锋，金光辉．不同滴灌量对马铃薯产量及品质的影响[J]．中国马铃薯, 2010, 24(5): 263–266
Han W F, Jin G H. Effects of different drip irrigation modes on yield and quality of potato[J]. Chinese Potato Journal, 2010, 24(5): 263–266
[30] 冯棣，刘晓菲，康跃虎，等．地下滴灌不同土壤水分调控对马铃薯产量和灌溉水利用效率的影响[J]．节水灌溉, 2015(8): 42–44
Feng D, Liu X F, Kang Y H, et al. Response of potato yield and irrigation water use efficiency to different soil water control under subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2015(8): 42–44
[31] 山东省花生研究所，万书波．中国花生栽培学[M]．上海：上海科技出版社, 2003
Shandong Peanut Research Institute, Wan S B. Peanut Cultivation in China[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003
[32] 杨传婷，张佳蕾，张凤，等．花生不同种植方式的耗水特点和水分利用效率差异研究[J]．山东农业科学，2012，44(9): 34–37
Yang C T, Zhang J L, Zhang F, et al. Research of water consumption characteristics and water use efficiency of peanut under different planting patterns[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44(9): 34–37
[33] Rohwer J, Gerten D, Lucht W. Development of functional irrigation types for improved global crop modelling[J]. PIK Report, 2007(104): 1–61
[34] 富作礼，赵景惠，范希芃．"小白龙"输水灌溉[J]．中国农村水利水电, 1982(2): 4–7
Fu Z L, Zhao J H, Fan X P. Water conveyance irrigation of hose[J]. China Rural Water and Hydropower, 1982(2): 4–7
[35] 李崇民，王国庆．软管输水灌溉在沧州地区的应用与测试分析[J]．水利水电技术, 1985(6): 48–55
Li C M, Wang G Q. Application and test analysis about water conveyance irrigation of hose in Cangzhou Region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1985(6): 48–55
[36] 张德山．我国北方地区管道输水灌溉调查[J]．灌溉排水学报, 1985(4): 8–13
Zhang D S. Investigation of pipe conveyance of water irrigation in northern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1985(4): 8–13
[37] 周婕．河北省平原区地下水足迹评价及县域种植模式优化研究[D]．北京：中国农业大学, 2016
Zhou J. Evaluation of optimized crop patterns and groundwater balance in Hebei Plain based on groundwater footprint[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016
[38] 徐长春，陈阜．"水足迹"及其对中国农业水资源管理的启示[J]．世界农业, 2015(11): 38–44
Xu C C, Chen F. Water footprint and its inspiration to water resources management of agriculture in China[J]. World Agriculture, 2015(11): 38–44
[39] 张立发．沧州市节水灌溉发展现状及对策[J]．河北工程技术高等专科学校学报, 2001(2): 14–16
Zhang L F. Cangzhou's present situation of developing water-saving irrigation and countermeasures[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2001(2): 14–16
[40] 杨晓琳．华北平原不同轮作模式节水减排效果评价[D]．北京：中国农业大学, 2015
Yang X L. Effects of diversified crop rotations on conserving groundwater resource and lowering carbon footprint in the North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015
[41] 王海霞．黄淮海北部平原区资源节约型种植制度研究[D]．北京：中国农业科学院, 2011
Wang H X. Study on resource-saving cropping systems in Northern Region of Huang-Huai-Hai Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011
[42] 石玉林，卢良恕．中国农业需水与节水高效农业建设[M]．北京：中国水利水电出版社, 2001
Shi Y L, Lu L S. High Efficiency Agriculture Construction of Agricultural Water Demand and Water Saving in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001
[43] 李爱国，李积铭，宋聪敏．河北省低平原区旱作节水农业技术[M]．北京：中国农业科学技术出版社, 2015
Li A G, Li J M, Song C M. Water-saving Agricultural Technique for Dryland Farming in Hebei Lowland Plain[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2015
[44] 张喜英．提高农田水分利用效率的调控机制[J]．中国生态农业学报, 2013, 21(1): 80–87
Zhang X Y. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 80–87
[45] 张凯，曾昭海，赵杰，等．华北平原压采地下水对小麦生产的影响分析[J]．中国农业科技导报, 2016, 18(5): 111–117
Zhang K, Zeng Z H, Zhao J, et al. Impact analysis of reduce the extraction of groundwater on wheat production in North China plain[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(5): 111–117
[46] 王海宁，张石春，毕远山．河北省平原区农业开采地下水特点[J]．水科学与工程技术, 2012(6): 1–5
Wang H N, Zhang S C, Bi Y S. Characteristic of agriculture groundwater exploitation in Hebei Plain[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2012(6): 1–5